

## REVIEW OF BIOINSPIRED APPROACHES IN ECOHOLONIC MANUFACTURING SYSTEMS

Ávila Gutiérrez, María Jesús <sup>1</sup>; Marcos Bárcena, Mariano <sup>2</sup>; Aguayo González, Francisco <sup>1</sup>; Peralta Álvarez, María Estela <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Sevilla, <sup>2</sup> Universidad de Cádiz

The increasing complexity of manufacturing processes, its distributed nature and use of information and smart technologies, determines that we should raise new tools with bio-inspired character for attempt to reconnect technical systems with nature. In the present work it is to establish the state of the art bio-inspired engineering to design sustainable manufacturing processes for screening at the engineering life cycle of manufacturing systems and industrial production complexes that allow them to conceive as nature.

**Keywords:** Bioinspired; complexity; distributed manufacturing; analogy.

## REVISIÓN DE ENFOQUES BIOINSPIRADOS EN LOS SISTEMAS DE FABRICACIÓN ECOHOLÓNICA

El incremento de la complejidad de los procesos de fabricación, su carácter distribuido y el uso de las TIC y tecnologías inteligentes, ha determinado que nos debamos de plantear nuevas herramientas con carácter bioinspirado que intenten reconectar los sistemas técnicos con la naturaleza. En el presente trabajo se pretende establecer el estado del arte sobre la ingeniería bioinspirada hacia el diseño de procesos de fabricación sostenibles para su proyección en la ingeniería del ciclo de vida de sistemas de fabricación y complejos de producción industrial que permita concebirlos como naturaleza.

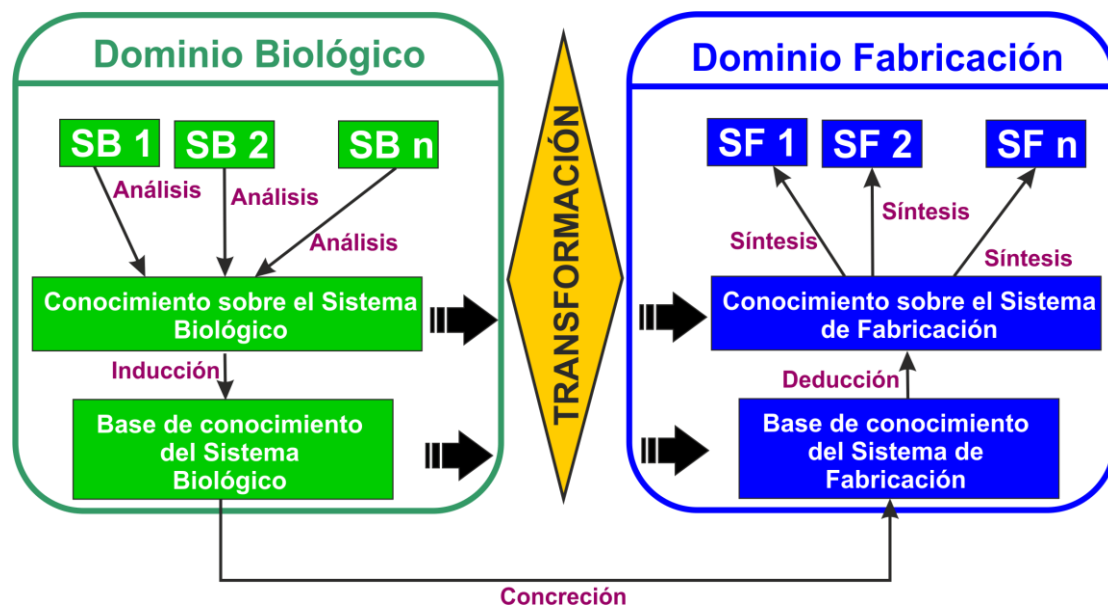
**Palabras clave:** Bioinspiración; complejidad; fabricación distribuida; analogía.

## 1. Introducción

El estudio de los seres vivos, el entorno que les rodea y los ecosistemas ha sido durante mucho tiempo ejemplo y fuente de inspiración para muchos investigadores desde las formas microscópicas hasta el complejo comportamiento de individuos, grupos y comunidades. No solo ha servido de inspiración sino que las características de sus estructuras y materiales, la eficiencia de sus procesos, el aprovechamiento de sus recursos o la optimización de sus funciones, ha sido objeto de análisis para tratar de conseguir su copia y simulación, orientadas hacia el futuro de nuevas fuentes de energía, sistemas de fabricación sensibles e inteligentes, robótica avanzada y productos innovadores. La naturaleza continuamente ha evolucionado y resuelto situaciones de eliminación y nuevo paso de individuos de una manera sostenible y efectiva, durante millones de años. Las estrategias de mutación, emergencia, recombinación, derivación, simbiosis o mutualismo, dan a la naturaleza ideas para transformar los sistemas técnicos, manifestando nuevas soluciones, combinando y reordenando las ya existentes, alterando su entorno o condiciones de uso o creando alianzas y cooperación.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo para conducir la ingeniería bioinspirada hacia el diseño de procesos de fabricación sostenibles. Para ello utilizaremos el proceso de razonamiento analógico presentado en la Figura 1, con la existencia de dos dominios: el dominio biológico y el dominio técnico. El dominio biológico es analizado para obtener la base de conocimiento de los sistemas biológicos. Esta base nos servirá para hacer la trasposición de conocimiento hacia los sistemas técnicos que en este caso es el de los sistemas de fabricación.

Figura 1. Modelo de diseño Bioinspirado



Para realizar la transformación entre ambos dominios necesitamos conocer es estado del arte de los enfoques bioinspirados en los sistemas de fabricación por lo que propondremos un método de revisión para conocer en que situación se encuentra.

## 2. Metodología de revisión de los enfoques bioinspirados

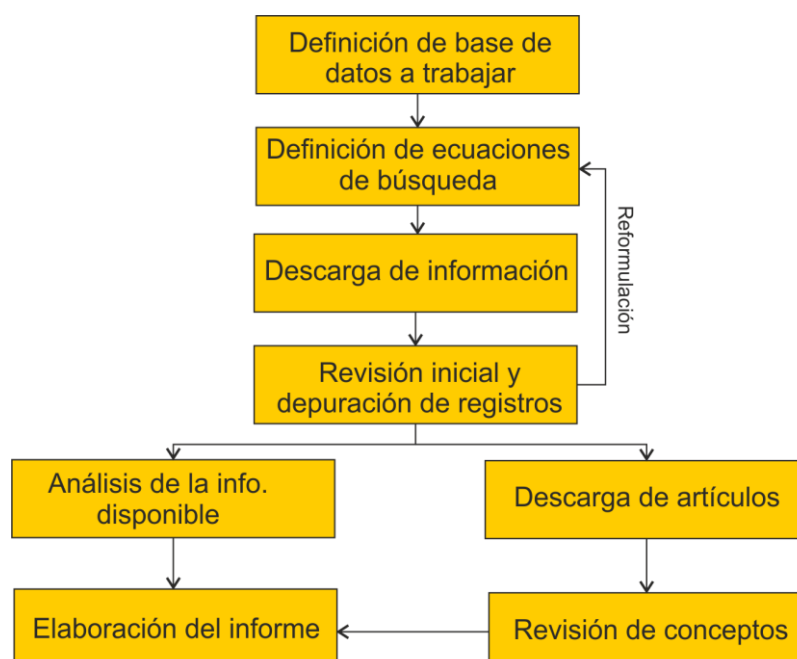
Para la revisión sobre los enfoques bioinspirados, se va a realizar una búsqueda a través de bases de datos multidisciplinarias y especializadas con el fin de identificar la producción literaria para un período 1990-2015 a nivel de artículos científicos relacionados con temáticas de fabricación bioinspirada desde su perspectiva conceptual en algunas disciplinas. Este proceso pretende:

- Determinar a través de una revisión conceptual sobre sistemas de fabricación bioinspirados, la evolución del tema desde la perspectiva teórica en las distintas disciplinas.
- Establecer un marco de referencia dentro del cual han sido contextualizados en los últimos años los conceptos asociados a fabricación bioinspirada, tales como Fabricación Bioinspirada en la Cadena de Valor (nivel macro), Fabricación Bioinspirada en las Organizaciones (nivel meso) y Fabricación Bioinspirada en los Sistemas de Fabricación (nivel micro).
- Determinar los distintos campos de aplicación en los cuales se desarrolla la investigación asociada a procesos de fabricación biológicos.

La metodología general para la revisión bibliográfica se presenta en la Figura 2. Esta investigación tiene como fuente de información las diferentes bases de datos disponibles a través del Sistema de Bibliotecas de la Universidad de Sevilla. A partir de estas bases de datos, se procedió a seleccionar aquellas acordes al objeto de estudio, teniendo en cuenta tres características básicas:

- Pertinencia temática, es decir, el contexto de los temas abordados para la investigación.
- Acceso a resultados: teniendo únicamente en cuenta las bases de datos que permiten el acceso a los documentos de manera completa (descarga de artículos) o parcial (abstract).
- Disponibilidad para tratamiento y exportación de referencias bibliográficas con el uso de Mendeley.

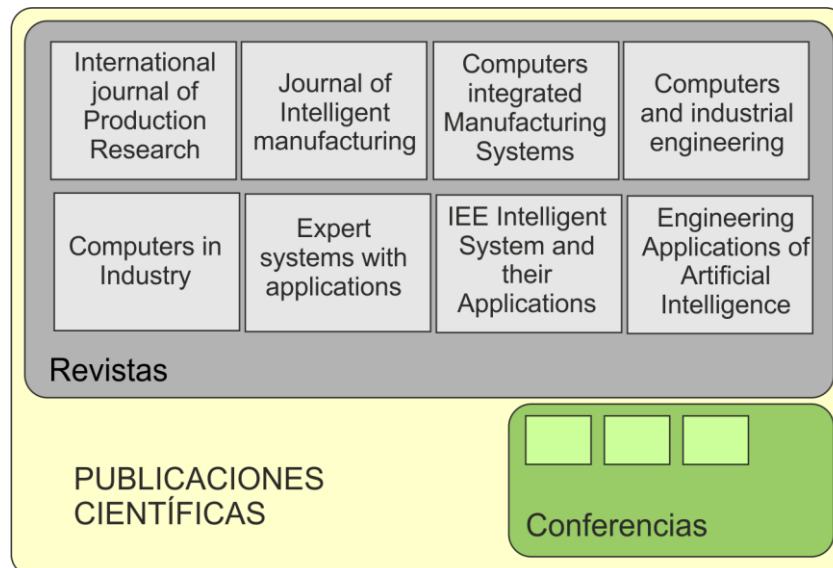
**Figura 2. Metodología de revisión de enfoques bioinspirados**



### 3. Revisión de enfoques bioinspirados

Como estudio previo al análisis de la información sobre los enfoques bioinspirados y su aplicación a los sistemas de fabricación, se ha hecho un análisis de las revistas más relevantes que contienen el tema. En la Figura 3 podemos ver una clasificación de las mismas.

**Figura 3. Clasificación de revistas relevantes que contienen información sobre enfoques bioinspirados y su aplicación a los sistemas de fabricación.**



Del análisis de información disponible en las distintas fuentes consultadas, sobre los sistemas de fabricación bioinspirados, se puede observar cómo muchos de los autores citados en este documento han desarrollado conceptos tales como sistemas biológicos de fabricación, fabricación biónica y fabricación inteligente. Entre los autores más representativos, podemos encontrar:

- Ueda, Fujii, Ohkura, Vaario y Hatono con el modelado de organismos vivos para los sistemas biológicos de fabricación (Ueda, Vaario & Ohkura, 1997), (Ueda, Kito & Fujii, 2006).
- Tharumarajah, Wells y Nemes con una comparación de los conceptos de fabricación emergentes: fractal, biónicos y holónicos (Tharumarajah, Wells & Nemes, 1998).
- Maione y Naso con estudios sobre Agentes inteligentes autónomos, en sistemas heterárquicos de fabricación (Maione & Naso, 2004).
- Ren, Leitao, Cheraghi estableciendo modelos inspirados en la auto-organización para dar a los sistemas de fabricación capacidad de adaptación al ambiente (Ren et al., 1999), (Leitao & Restivo, 2008), (Cheraghi, Sheelavant & Liu, 2004).
- Leitao, Barbosa, y Trentesaux recopilando aplicaciones de los elementos biológicos para resolver problemas complejos de ingeniería (Barbosa, 2015).

Existen diferentes ámbitos de aplicación de los elementos biológicos y entre ellos podemos encontrar referencias de autores en el área de las redes de comunicación, control, finanza, diseño de hardware, procesamiento de imagen, medicina, militar, energía,

robótica, redes de sensores, control de tráfico y sistemas de fabricación entre otras (Barbosa, 2015).

Muchos autores intentan responder a diversos problemas que surgen en el ámbito de fabricación mediante los enfoques bioinspirados.

Los enfoques bioinspirados tratan de dar solución a los problemas que se dan en los sistemas técnicos basándose en los sistemas biológicos, para ello, existen numerosas bases de datos que nos ayudan y dan soporte en ese proceso de transformación.

Entre algunas bases de datos podemos encontrar entre las más relevantes las que aparecen en la Tabla 1:

**Tabla 1. Bases de datos bioinspiradas**

<b>Base de datos</b>	<b>Investigadores</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Información de búsqueda</b>	<b>Herramienta de búsqueda</b>
Biologists at the Design Table (BaDTs)	Biomimicry Guild	Sistemas Naturales (especies y organismos)	Estrategias de la naturaleza	Sitio web
Sapphire	Instituto Indio de ciencia en Bangalore	Sistemas Naturales y artificiales	Funciones, estructuras y comportamientos	Un software. Idea-Inspire
Base de datos Funcional	Bruck y otros autores	Conceptos y productos de diseño bioinspirado	Plantillas de descripción funcional, repositorio de conceptos y productos bioinspirados y herramientas de búsqueda	Búsquedas por palabras clave, filtros de categoría y búsqueda de funciones.
Bio-TRIZ	Vincent and Mann	Sistemas Naturales y artificiales	Funciones o contradicciones de un problema de diseño	Matriz de contradicciones de TRIZ
Base de datos Biomimicry (Biomimicry Guild Database)	: Intituto Rocky Mountain y Biomimicry Guild	Información biológica para identificar analogías biológicas	problemas; organismos; productos; estrategias; personas;	Sitio web
Biomimicry Gui (Repositorio)	Wilson y Rosen	Sistemas Naturales y artificiales	Flujos (entrada/salida); comportamiento (acción/ atributo); estructura; dominio (Botánica,/Biología,/Ingeniería); estrategia del sistema	Software que depende de la ontología y su descripción lógica usando las interfaces Protegé, RacerPro y Dig.

Los sistemas de fabricación son uno de los ámbitos de aplicación de los sistemas biológicos y dentro de los sistemas de fabricación bioinspirados encontramos varias características tales como:

- Auto-organización (Self-organization): se refiere a sistemas que necesitan poca supervisión y control, poseen módulos independientes y autónomos que cooperan de manera inteligente para adaptarse rápidamente a las variaciones del entorno (Fernandez, Maldonado & Gershenson, 2014).
- Agilidad habilidad para trabajar en un ambiente impredecible. A esta característica se asocian atributos como la reactividad, adaptabilidad, robustez y la transformación del conocimiento (Hon, 2005).
- Complejidad de fabricación como un elemento característico del sistema que integra varios aspectos fundamentales del entorno (Calinescu, Efstathiou & Huatucu, 2001).
- Autoconfiguración, la capacidad de adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes mediante la adición, eliminación o modificación de entidades, sin interrumpir la producción (Leitao, Barbosa, & Trentesaux, 2012).
- Auto-sanación (Self-healing) que permite diagnosticar desviaciones debidas a condiciones inesperadas y actuar de forma proactiva para normalizarlas estas desviaciones.
- Flexibilidad, la capacidad de un sistema para responder a posibles cambios internos o externos. La flexibilidad de un sistema es la facilidad con la que este responde a la incertidumbre (Gola & Świć, 2012).

Estas características expuestas determinan el interés de disponer de Arquitecturas de Referencia Integradas concebidas con la variedad requerida y los mecanismos de su gestión para adaptarse al medio ambiente en el que opera.

Para estructurar la información sobre los mismos, nos basaremos en la propuesta de arquitectura abierta Ecoholónica resultado de estudios previos a este trabajo y que podemos ver de forma resumida en apartado 4.

#### 4. Modelo formal Holónico bioinspirado

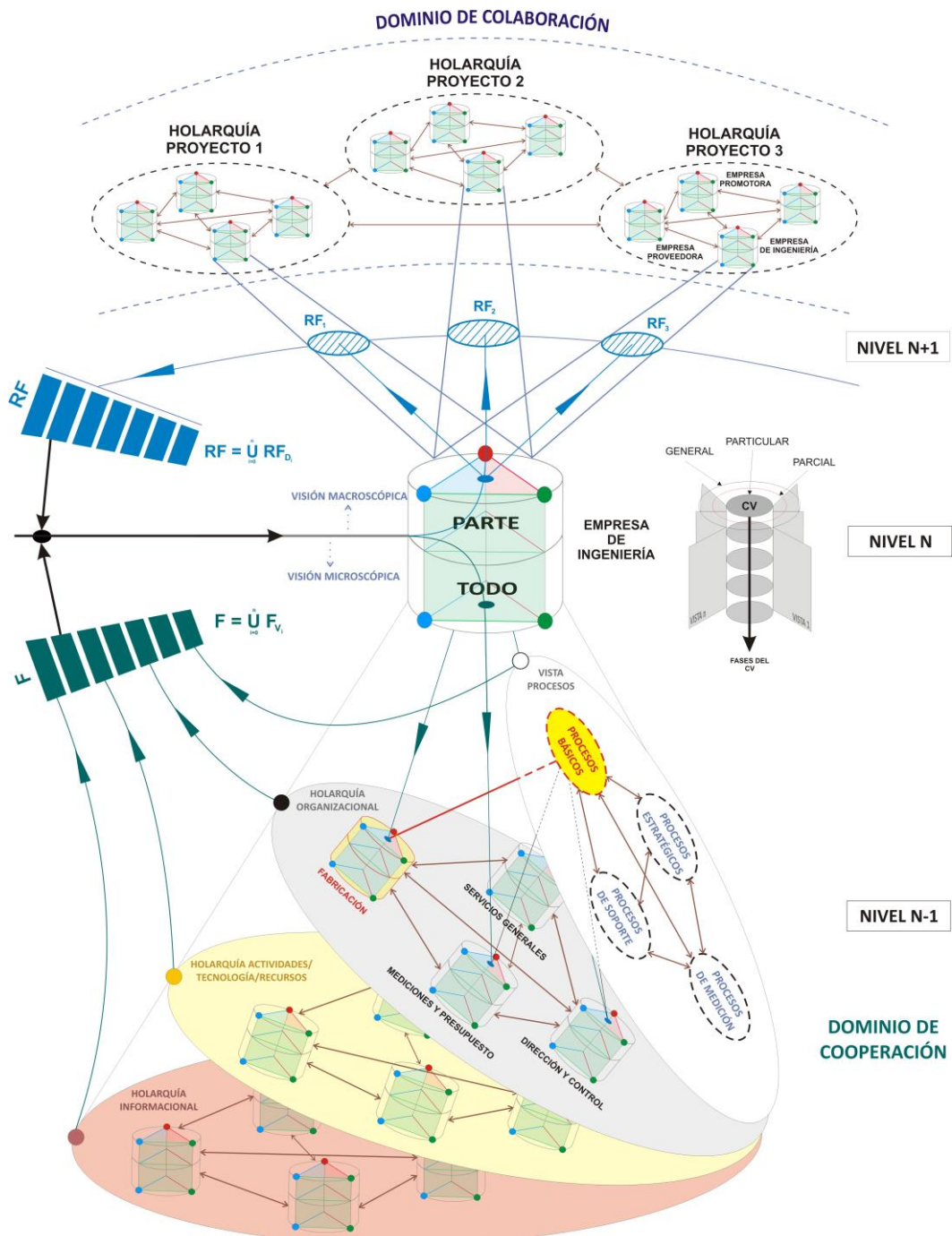
El modelo propuesto está compuesto de distintas vistas holárquicas que a su vez están formadas por holones u otras organizaciones holónicas de menor tamaño. Cada holón es una unidad organizacional autónoma que ejecuta aquellos procesos para los cuales es más competente. Los holones cooperan entre sí a fin de que se ejecuten todos los procesos que son necesarios para producir los productos y/o prestar los servicios que le han sido encomendados. A efectos de modelado, esta arquitectura Ecoholónica queda caracterizada en las siguientes dimensiones y niveles:

- **Holarquía de nivel n+1:** define el DOMINIO COLABORATIVO y los requerimientos holónicos. Nivel macro: Cadena de suministro.
- **Holón de nivel n:** actúa como interfaz de adaptación de la variedad holónica entre los niveles n-1 y n+1. Nivel meso: Organización.
- **Holarquía de nivel n-1:** define el DOMINIO COOPERATIVO y la competencia o capacidades holónicas. Nivel micro: Sistema de Fabricación.

Cada una de las holarquías de la Arquitectura anterior se corresponde con un nivel diferente que será estudiado para encontrar los enfoques bioinspirados de los mismos. Estos niveles son:

- **Nivel Macro (holarquía N+1)** asociado a la Cadena de Suministro bioinspirada (Jianhua & Huang, 2010).
- **Nivel Meso (Holarquía N)** asociada a la organización bioinspirada (Montoya & Castellanos, 2010), (Rivas, 2002).
- **Nivel Micro (Holarquía N-1)** asociada a los sistemas de fabricación bioinspirados. Podemos encontrar referencias en el ámbito del ensamblado-desensamblado (Lv, & Cong, 2009), distribución en planta (Shunichi, Kazuho, & Kenshu, 2010), la planificación y programación (Zbibv et al 2010), (Zhao, Liang & Kai, 2009) y el control de la producción entre otras (Sallez, Berger, & Trentesaux, 2009).

Figura 4. Arquitectura Abierta Ecológica

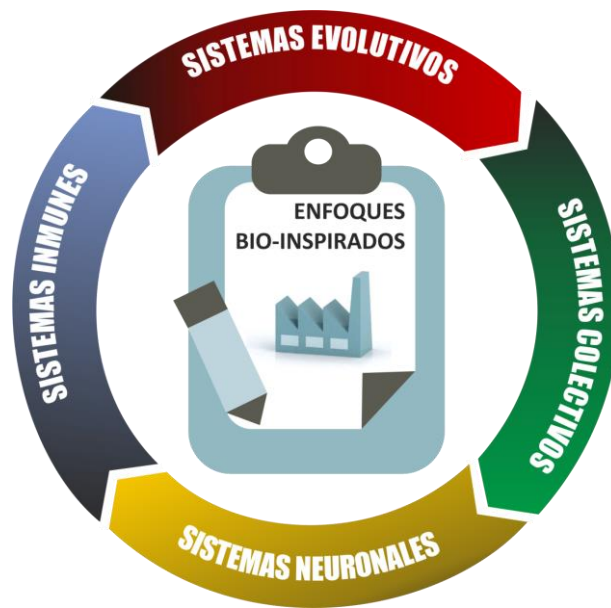




Si nos centramos en la vista informacional del nivel micro encontramos diversas publicaciones de carácter bioinspirado orientadas a:

- Los sistemas evolutivos
- Los sistemas colectivos
- Los sistemas neuronales
- Los sistemas inmunes

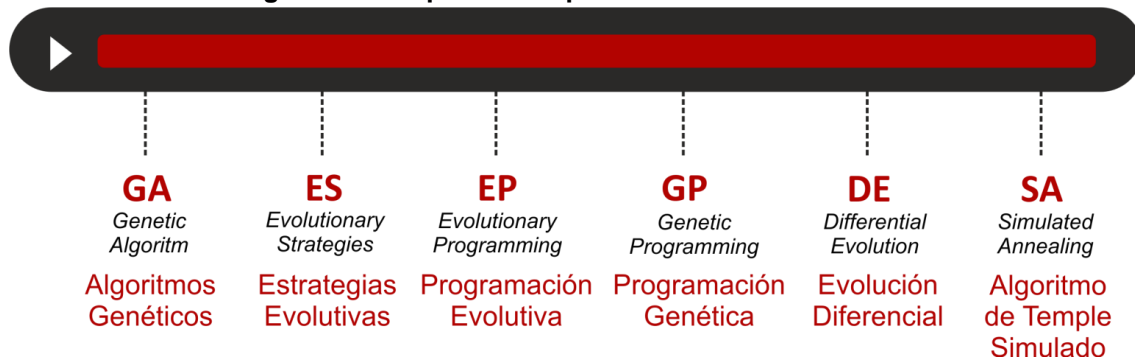
**Figura 5. Enfoques bioinspirados en el nivel micro**



#### 4.1. Sistemas Evolutivos

En un Sistema Evolutivo (SE) se intenta resolver un determinado problema por medio de la manipulación de un conjunto de individuos (población) que representan las soluciones de dicho problema, cada individuo se codifica en uno o más cromosomas que son estructuras computacionalmente manipulables (por ejemplo un vector) (Kumar, 2011), (Hur, 2006), (Jakovic, 2007).

**Figura 6. Enfoques bioinspirados: Sistemas inmunes**





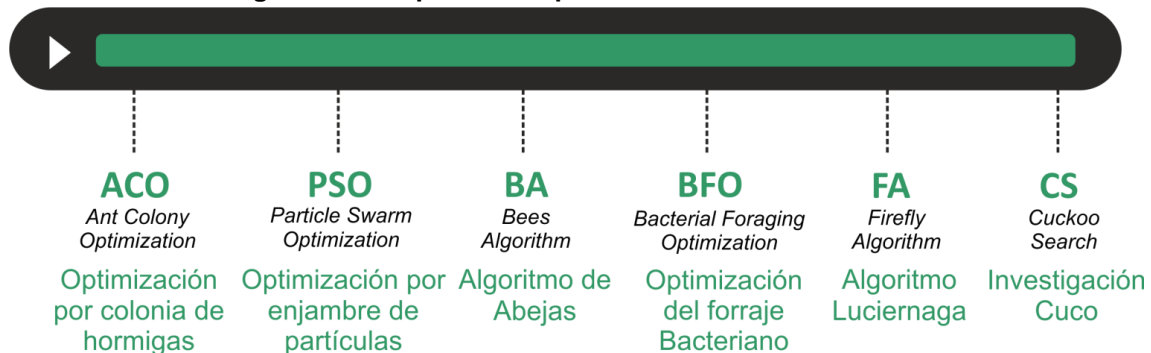
#### 4.2. Sistemas Colectivos

El comportamiento de algunos animales que se organizan en grupos, especialmente insectos como las hormigas, termitas, abejas y avispas; ha inspirado la creación de algoritmos que intentan modelar los principios por los que se rigen estos insectos “sociales”.

La integración y la coordinación de tareas de los individuos que componen estas colonias no requieren de un supervisor o jefe central que de órdenes a todos. Dichos individuos resuelven sus problemas ligados a su supervivencia, de forma distribuida y paralela, son capaces de llevar a cabo tareas inteligentes como encontrar el camino más corto entre dos puntos, construir complejas estructuras y repartir tareas entre si.

El comportamiento aparentemente inteligente que presentan los enjambres o colonias de insectos se debe precisamente a su forma de organización. Como individuos aislados estos insectos realmente son poco sagaces, pero como colonias pueden responder de forma rápida y efectiva a su entorno (Burnwal, & Deb, 2012), (Babukartik & Dhavachelvan, 2012), (Raju, Babukarthik & Dhavachelvan, 2013).

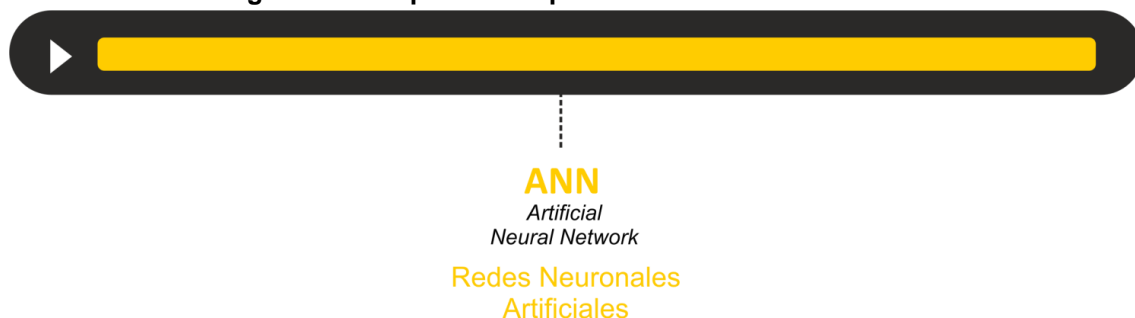
Figura 7. Enfoques bioinspirados: Sistemas colectivos



#### 4.3. Sistemas Neuronales

Estos sistemas se asemejan al funcionamiento del cerebro humano. Se inspiran en el sistema nervioso biológico y tratan de interconectar neuronas para que colaboren entre sí con objeto de producir un estímulo de salida (Taghi, Niaki & Davoodi, 2009).

Figura 8. Enfoques bioinspirados: Sistemas neuronales



#### 4.4. Sistemas Inmunes

El sistema inmunológico humano carga con la gran responsabilidad de detectar las infecciones o ataques de agentes externos a nuestro cuerpo (*patógenos*), como *bacterias* y *virus*, y **defendernos** de los mismos, es decir, tiene la responsabilidad de mantener nuestro cuerpo saludable. El mecanismo que utiliza el sistema inmunológico humano para **reconocer y contrarrestar la presencia de atacantes externos** ha servido de inspiración para resolver problemas de ciencia e ingeniería, relacionados principalmente con la seguridad de un sistema.

Desde que los Sistemas Inmunológicos Artificiales fueron propuestos un **gran número de modelos** han surgido con el paso del tiempo, principalmente *aplicados en áreas como reconocimiento de patrones, detección de fallas y seguridad computacional*. Entre los modelos fundamentales y más estudiados se encuentran las *redes inmunológicas, la selección clonal y la selección negativa* (Ong, Tay, & Kwoh, 2005), (Lu, & Yang, 2009), (Yang, et al., 2008).

Figura 9. Enfoques bioinspirados: Sistemas inmunes



#### 4. Conclusiones

Observando el funcionamiento de un sistema natural maduro en equilibrio podemos descubrir algunos rasgos que nos pueden ayudar a comprender a los sistemas industriales. De esta forma, con este trabajo se pretende establecer una relación de analogía entre los sistemas naturales e industriales, posibilitando el diseño y gestión de sistemas de fabricación como naturaleza sin solución de continuidad.

En cuanto a las aplicaciones actuales, encontramos los algoritmos bio-inspirados que constituyen una buena alternativa para solucionar problemas de alta complejidad. Los tipos de problemas que estos algoritmos solucionan más efectivamente son aquellos relacionados con la optimización, reconocimiento de patrones, caracterización de datos de entrada y aprendizaje adaptativo.

Los **Sistemas Evolutivos** combinan mecanismos de búsqueda dirigida y búsqueda aleatoria en problemas de optimización. La combinación de estos dos mecanismos le concede a los Sistemas Evolutivos una propiedad que no poseen otros métodos de búsqueda exhaustiva.

Las **Redes Neuronales Artificiales** están lejos de asemejarse al complejo funcionamiento del cerebro humano. Sin embargo, los ingeniosos mecanismos con los que opera les permite realizar tareas que para cualquier otro método resultarían demasiado costosas. Además, la posibilidad de interconectar y relacionar cada uno de los nodos de múltiples maneras, de cambiar los parámetros de los mismos y de emplear diferentes modelos en una sola red, hacen que estas se adapten fácilmente para resolver eficientemente cualquier problema.

La **Inteligencia Colectiva** constituye un paradigma social y colaborativo de pequeños agentes. La filosofía del trabajo cooperativo y del “divide y vencerás” es una buena alternativa para resolver problemas de optimización y simulación de sistemas con múltiples variables.

Los **Sistemas Inmunológicos Artificiales** son un tema innovador que ofrece muchas posibilidades y permite diversas aplicaciones, que la convierten en una herramienta eficaz en la solución de problemas. Los sistemas inmunológicos artificiales están siendo usados en diversas aplicaciones como detección de anomalías, reconocimiento de patrones, minería de datos, seguridad computacional, control adaptativo y detección de fallas

## 5. Referencias

- Babukartik, RG & Dhavachelvan, P. (2012). Hybrid algorithm using the advantage of aco and cuckoo search for job scheduling. *International Journal of Information Technology Convergence and Services*, 2.
- Barbosa, J. (2015). Self-organized and evolvable holonic architecture for manufacturing control, Tesis Doctoral, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambresis.
- Bowden, R.O., Hall, J.D. & Usher, J.M. (1996). Integration of evolutionary programming and simulation to optimize a pull production system. *Computers & industrial engineering*, 31(1):217–220.
- Burnwal, S. & Deb, S. (2012). Scheduling optimization of flexible manufacturing system using cuckoo search-based approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pages 1–9.
- Calinescu, A., Efstathiou, J. & Huatucu, L. (2001). Classes of complexity in manufacturing, *Proc. National Conf. Manufacturing. Research*, UK.
- Cheraghi, S.H., Sheelavant, R.R. & Liu, S.H. (2004). Adaptive process planning in discrete parts manufacturing environment, *IIE Annual Conference and Exhibition*.
- Fernandez, N., Maldonado, C. & Gershenson C. (2014). Information Measures of Complexity, Emergence, Self-organization, Homeostasis, and Autopoiesis, *Guided Self-Organization*, 1–35.
- Gola, A., & Świć, A. (2012). Directions of Manufacturing Systems. Evolution from the Flexibility Level Point of View. *Innovations in Management and Production Engineering*, Oficyna Wyd. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, 226-238.
- Hon, K. (2005). Performance and Evaluation of Manufacturing Systems, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 54, 139–154.
- Hur, J., Lee, H. & Baek, J.G. (2006). An intelligent manufacturing process diagnosis system using hybrid data mining. *Advances in Data Mining. Applications in Medicine, Web Mining, Marketing, Image and Signal Mining*, pg. 561–575.
- Jakobovic, D., Jelenkovic, D. & Budin, L. (2007). Genetic programming heuristics for multiple machine scheduling. *Genetic Programming*, pages 321–330.
- Jianhua, W. & Huang, X. (2010). A hybrid genetic algorithm for agile supply chain scheduling optimization, *Proc. 2nd International Conference on Future Computer and Communication (ICFCC)*.
- Kumar, V. Murthy, A.N.N. & Chandrashekar, K. (2011). Scheduling of flexible manufacturing systems using genetic algorithm: A heuristic approach. *J. Ind. Eng. Int*, 7(14):7–18.
- Leitao, P. Barbosa, J. & Trentesaux D. (2012). Bio-inspired multi-agent systems for reconfigurable manufacturing systems, *Engineering applications or artificial intelligence*, 25, 934-944.
- Leitao, P. & Restivo, F. (2008). A holonic approach to dynamic manufacturing scheduling, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. 24, 625–634.
- Lu, H. & Yang, J. (2009). An improved clonal selection algorithm for job shop scheduling. In *Intelligent Ubiquitous Computing and Education*, 2009 International Symposium on, pages 34–37. IEEE.
- Maione, G. & Naso, D. (2004). Modelling adaptive multi-agent manufacturing control with discrete event system formalism, *International Journal of Systems Science*. 35, 591-614.
- Montoya, L. & Castellanos, O. (2010). Características de una aproximación biológica para el estudio de mecanismos de integración empresarial, *XIV Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Administrativas-Monterrey*.
- Ong, Z, Tay, J. & Kwoh, C. (2005). Applying the clonal selection principle to find flexible job-shop schedules. *Artificial Immune Systems*, pages 442–455.

- Raju, R, Babukarthik, R.G. & Dhavachelvan, P. (2013). Hybrid ant colony optimization and cuckoo search algorithm for job scheduling. *Advances in Computing and Information Technology*, pages 491–501.
- Ren, S., Liu, W., Liu, Z. & Dong, J. (1999). Self-organization-basic model for advanced manufacturing systems, *Journal of Tsinghua University*. 39, 87-90.
- Rivas, L. A. (2002). Nuevas formas de organización, *Estudios Gerenciales*, 18, 13-45.
- Lv, H. & Cong, L. (2009). A discrete particle swarm optimization algorithm for assembly sequence planning, *Proc. 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety*.
- Sallez, Y. Berger, T. & Trentesaux D. (2009). A Stigmergic Approach for Dynamic Routing of Active Products in FMS, *Computers in Industry*, 60, 204–216.
- Shunichi, O., Kazuho, Y. & Kenshu, O. (2010). Solving Facility Layout Problem via Particle Swarm Optimization, *Proc. 3rd International Joint Conference on Computational Science and Optimization*.
- Taghi, S., Niaki, A. & Davoodi, M. (2009). Designing a multivariate– multistage quality control system using artificial neural networks. *International Journal of Production Research*, 47(1):251–271.
- Tharumarajah, A., Wells, A. & Nemes, L. (1998) Comparison of emerging manufacturing concepts, *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*.
- Ueda, K. Kito, T. & Fujii, N. (2006). Modeling Biological Manufacturing Systems with Bounded-Rational Agents, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 55, 469-472.
- Ueda, K., Vaario, J. & Ohkura, K. (1997). Modelling of biological manufacturing systems for dynamic reconfiguration, *CIRP Annals- Manufacturing Technology*. 46, 343- 372.
- Yang, J., Sun, L., Lee, H.P., Qian, Y. & Liang, Y. (2008). Clonal selection based memetic algorithm for job shop scheduling problems. *Journal of Bionic Engineering*, 5(2):111–119.
- Zbib, N., Pach, C., Sallez, Y. & Trentesaux, D. (2010). Heterarchical production control in manufacturing systems using the potential fields concept, *Journal of Intelligent Manufacturing*.
- Zhao, D., Liang L. & Kai, Z. (2009). An improved ant colony optimization for communication network routing problem. *Proc. 4th International Conference on Bio-Inspired Computing*.